МОДЕЛЮВАННЯ СЦЕНАРІЇВ МОДЕРНІЗАЦІЇ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ ДО 2030 РОКУ З МЕТОЮ СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ

Шатоха В.І., Матухно О.В.

Національна металургійна академія України
пр. Гагаріна, 4, 49005, м. Дніпро
shatokha@gmail.com, helen.matukhno@gmail.com

Мета роботи – опрацювання сценаріїв скорочення обсягів викидів парникових газів у металургійній галузі шляхом впровадження найкращих доступних технологій за умов реалізації різних варіантів стратегії розвитку виробництва та споживання сталі. Задача дослідження – моделювання обсягів викидів діоксиду вуглецю за різними сценаріями розвитку виробництва та споживання сталі при одночасному впровадженні найкращих доступних технологій. У роботі виконано моделювання модернізації металургійної галузі України до 2030 року з метою скорочення викидів парникових газів шляхом впровадження найкращих доступних технологій в умовах реалізації різних сценаріїв розвитку металургійної галузі. Показано, що впровадження ключових найкращих доступних технологій може забезпечити скорочення питомих викидів CO₂ на чверть від поточного рівня. Лише за умов відсутності зростання виробництва сталі впровадження найкращих доступних технологій може забезпечити скорочення середньорічного показника викидів CO₂ протягом 2021–2030 років. За умов помірного зростання виробництва сталі впровадження найкращих доступних технологій забезпечує стабілізацію сумарних викидів приблизно на сучасному рівні, а за умов пришвидшеного зростання виробництва сталі загальні викиди CO₂ збільшуються навіть у разі впровадження найкращих доступних технологій. Результати досліджень свідчать, що з урахуванням міжнародних зобов'язань України зі скорочення викидів парникових газів протягом наступного десятиріччя має розпочатися впровадження інноваційних технологій виробництва чавуну і сталі з метою забезпечення більш радикального скорочення викидів CO₂, ніж це можливе шляхом впровадження найкращих доступних технологій. Результати роботи можуть бути застосовані в процесі розробки державної стратегії розвитку металургійної галузі України з урахуванням кліматичних зобов'язань. *Ключові слова:* кліматичні зобов'язання, парникові гази, викиди, діоксид вуглецю, металургійна галузь, моделювання, найкращі доступні технології.

Modeling the scenarios of Ukrainian steel industry modernization towards 2030 aimed at carbon dioxide emissions reduction. Shatokha V., Matukhno E.

The purpose of the work is to develop scenarios for reducing greenhouse gases emissions of the steel industry by introducing the best available technologies under conditions of various steel production and consumption strategies implementation. The objective of the study is modeling carbon dioxide emissions under various steel production and consumption scenarios while introducing the best available technologies. Modeling of Ukrainian steel industry's modernization pathways towards 2030 has been performed aimed at greenhouse gases emissions reduction via deployment of the best available technologies' in the context of various development scenarios implementation. It is shown that the deployment of key best available technologies can provide reduction in specific CO₂ emissions by a quarter from the current level. Only in the absence of growth in steel production, the introduction of the best available technologies can ensure a reduction of the average annual CO₂ emissions over the period of 2021–2030. Under conditions of moderate growth in steel production, the introduction of the best available technologies ensures the stabilization of total emissions approximately at the current level, whereas under conditions of accelerated growth in steel production the total CO₂ emissions increase even if the best available technologies are implemented. Results of research suggest that, taking into account Ukraine's international commitments to reduce the greenhouse gases emissions, over the next decade, the introduction of innovative iron and steel technologies for the production should begin to ensure a more radical reduction in CO₂ emissions than it can be achieved using the best available technologies. The results of the work can be applied in the state strategy for the development of the steel industry in Ukraine, taking into account climate commitments. *Key words:* climate commitments, greenhouse gases, emissions, carbon dioxide, steel industry, modeling, best available technologies.

Постановка проблеми. Стратегічні засади соціально-економічного розвитку України значною мірою визначаються Угодою про асоціацію Україна-ЄС (ратифікована 1 вересня 2017 року), що охоплює низку економічних та регуляторних питань, включаючи проблеми, пов'язані з запобіганням зміні клімату, які розглядаються у розділі VI та додатках XXX, XXXI до Угоди [1]. Однією з вимог, що висуваються в Угоді, є встановлення процедур моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів від енергетичних та промислових установок, а також запровадження системи торгівлі квотами на викиди парникових газів.

Актуальність дослідження. У грудні 2019 року прийнято Закон України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» [2], який почне діяти з 01.01.2021 року. Закон розроблено відповідно до зобов'язань України в рамках Угоди про асоціацію, зокрема щодо транспонування Директиви 2003/87/ЄС про створення системи торгівлі квотами на викиди парникових газів [3].

Таким чином, із 2021 року в Україні має бути запроваджена єдина для всіх підприємств система обліку викидів парникових газів, а пошук інструментів та шляхів зменшення обсягів викидів стане надзвичайно актуальним для вітчизняної промисло-

вості. Водночас нині бракує науково обґрунтованого аналізу, на підставі якого можна було б вибрати стратегію розвитку, зокрема, чорної металургії з урахуванням кліматичних зобов'язань.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями щодо запобігання зміні клімату полягає в пошуку інструментів і шляхів зменшення обсягів викидів парникових газів металургійною галуззю України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Металургійна галузь в Україні є джерелом 77% промислових викидів парникових газів. У 2018 році (останній рік, за який на час написання цієї статті є детальний кадастр викидів в Україні) безпосередньо виробництво основних продуктів та напівпродуктів – чавуну, сталевих заготовок, агломерату та окатишів спричинило викиди 39,88 млн т парникових газів. Додатково при енергетичному використанні технологічних газів (насамперед колошникового газу доменних печей) утворилося 10,19 млн т парникових газів. Таким чином, загальні викиди парникових газів підприємствами гірничо-металургійного комплексу становили 50,07 млн т на рік [4].

Незважаючи на наявність значних надлишкових потужностей із виробництва сталі у світі, Міжнародне енергетичне агентство прогнозує зростання попиту на сталь на 51% до 2050 року від рівня 2011 року [5], отже, Україна може зберегти свою нішу у світовому експорті сталі [6]. Разом із тим потреба в заміні металоємного обладнання в промисловості і комунальному секторі становить понад 330 млн т [7], що перевищує десятирічний обсяг виробництва при повному використанні наявних потужностей. З огляду на це металургійне виробництво в Україні у видимій перспективі має усі можливості для збереження істотних обсягів. Варто зазначити, що головним імпортером української металопродукції є Європейський Союз (приблизно 32% від загального експорту), але можливість збереження цього ринку збуту залежатиме від дотримання українськими виробниками сталі вимог Угоди про асоціацію, зокрема, у сфері запобігання зміні клімату [8].

Метою цієї роботи є опрацювання сценаріїв скорочення обсягів викидів парникових газів у металургійній галузі шляхом впровадження найкращих доступних технологій (НДТ) за умов реалізації різ-

них варіантів стратегії розвитку виробництва та споживання сталі.

У процесі дослідження було сформульовано такі задачі:

- 1) моделювання сценаріїв виробництва та споживання сталі в Україні до 2030 року;
- 2) визначення динаміки впровадження НДТ;
- 3) моделювання обсягів викидів діоксиду вуглецю за умов реалізації різних сценаріїв розвитку виробництва та споживання сталі при одночасному впровадженні НДТ.

Новизна. Виконано моделювання сценаріїв скорочення викидів парникових газів шляхом впровадження найкращих доступних технологій у металургійній галузі України до 2030 року.

Методологічне або загальнонаукове значення. Результати роботи можуть бути застосовані у процесі розробки державної стратегії розвитку металургійної галузі України з урахуванням кліматичних зобов'язань.

Для вирішення поставлених задач дослідження розроблено модель оцінювання можливості скорочення витрати енергії та викидів парникових газів шляхом запровадження найкращих доступних технологій до 2030 року, що відповідає першому періоду впровадження Паризької Угоди. Викиди CO₂ обчислюються з урахуванням обсягів виробництва, технологій та ресурсів, що застосовуються. Передбачено взаємодоповнюючі сценарії модернізації із застосуванням низки ключових НДТ, які забезпечують економічно ефективне скорочення викидів CO₂. У моделі передбачено, що між 2021 та 2030 роками виробництво та споживання готової сталі змінюватимуться з різним середньорічним темпом зростання в складних відсотках (Compound Annual Growth Rate, CAGR) на рік, а саме:

$$CAGR(t_0, t_n) = \left(\frac{V(t_n)}{V(t_0)} \right)^{\frac{1}{t_n - t_0}} - 1, \quad (1)$$

де $V(t_0)$, $V(t_n)$ – початковий та кінцевий обсяги споживання відповідно, t_0 , t_n – початковий та кінцевий роки відповідно.

Показник CAGR розраховано методом послідовних ітерацій. Модель розглядає три сценарії щодо виробництва та споживання сталі, наведені в таблиці 1. Імпорт сталі в Україну прийнято рівним нулю –

Таблиця 1

Сценарії виробництва та споживання сталі

№	Назва сценарію	Показники на 2030 рік, млн т		CAGR, %		Коментарі
		Виробництво	Споживання	Виробництво	Споживання	
1	Помірне виробництво, помірне споживання	30	10	3,4	5,4	споживання сталі приблизно відповідає рівню перед фінансовою кризою 2008 року
2	Високе виробництво, високе споживання	35	15	4,8	9,0	виробництво сталі приблизно відповідає рівню перед фінансовою кризою 2008 року
3	Помірне виробництво, високе споживання	30	15	3,4	9,0	сценарій найбільше відповідає концепції сталого економічного розвитку

не лише для спрощення моделі, але й з урахуванням того, що більшість імпортованого асортименту виробляється або могла б бути вироблена на вітчизняних підприємствах. За базовий рівень виробництва сталі прийнято показники 2019 року.

Показники скорочення викидів парникових газів внаслідок впровадження НДТ прийнято згідно з рекомендаціями УкрДНТЦ «Енергосталь» [9]. Як базові вихідні дані щодо викидів парникових газів прийнято показники 2018 року, за якими нині доступна найбільш надійна офіційна статистика. Зокрема, прийнято такі показники викидів діоксиду вуглецю:

– при виробництві чавуну у доменних печах 1,66 т CO₂/т чавуну (враховуючи виробництво коксу та агломерату);

– загалом при виробництві чорної сталі, з огляду на виробництво енергії з доменного газу та випал вапняку 2,38 т CO₂/т сталі.

Статистичні дані та прогнозовані показники технологічної структури виробництва та розливки сталі в Україні наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Технологічна структура виробництва та розливки сталі (%)

Технологія	Роки	
	2018	2030
<i>виробництво</i>		
Мартен	22,8	0
Конвертер	69,7	92,5
Електродугова піч	7,5	7,5
<i>розливка</i>		
У зливки	46,0	5,0
Безперервний	54,0	95,0

У моделі прийнято припущення щодо ринку та особливостей виробництва сталі в Україні:

– на виробництво 1 т чавуну витрачається 1 т агломерату, а решту необхідної залізорудної сировини становлять окатиші;

– на виробництво 1 т сталі витрачається 0,80 т чавуну (решта – металолом);

– вихідне виробництво сталі (2019 рік) – 20,8 млн т на рік;

– вихідне споживання сталі (2018 рік) – 5,4 млн т на рік.

Прийняті у моделі припущення щодо потенціалу зі скорочення викидів діоксиду вуглецю та особливостей впровадження найкращих доступних технологій наведено в таблиці 3. Детальний опис цих технологій виходить за рамки цієї роботи, але варто зазначити, що їх впровадження узгоджується з кращими світовими практиками та має забезпечити відповідність української металургії світовому рівню не лише за викидами парникових газів, але й за витратою енергоносіїв.

Щодо запровадження безперервної розливки, передбачено залишити 5% розливки в зливки, враховуючи можливе виробництво сталі для спеціальних потреб (наприклад, крупногабаритні зливки). Як сценарій модернізації технології виробництва сталі передбачено заміну мартенівського виробництва конвертерним при збереженні частки виробництва у електродугових печах (ЕДП) на існуючому рівні. Збільшення частки виробництва сталі в ЕДП могло б забезпечити більш суттєве скорочення викидів CO₂, але на користь застосованого підходу свідчать такі фактори:

1) в Україні існує дефіцит якісного скрапу, водночас наявні величезні ресурси якісної залізної руди. Навіть за сценаріями, передбаченими у табл. 1, потреба у скрапі для конвертерного виробництва має становити 6–7 млн т на рік, а за умов зростання частки виробництва сталі в ЕДП ця потреба суттєво збільшиться;

2) окрім того, суттєве збільшення частки ЕДП потребуватиме досить радикальної зміни інфраструктури виробництва сталі, що пов'язане з додатковими фінансовими витратами;

3) нарощування частки виплавки сталі в ЕДП не відповідає сценарію модернізації виробництва сталі Міжнародного енергетичного агентства B2DS (Beyond 2°C Scenario [10]), спрямованого на обмеження глобального потепління в межах менш ніж 2°C, де за стратегічний напрям прийнято розвиток інноваційного виробництва чавуну, яке найбільш ефек-

Таблиця 3

Скорочення викидів CO₂ та обсяги впровадження НДТ

№	Впроваджені найкращі доступні технології	Скорочення викидів CO ₂ за даними [9]	Частка виробництва, де впроваджено НДТ, %		Рік початку швидкого зростання
			2018	2030	
1	Модернізація аглофабрик	31 кг CO ₂ /т агломерату	0	100	2021
2	Впровадження газових безкомпресорних утилізаційних турбін (ГУБТ)	30,2 кг CO ₂ /т чавуну	0	100	2022
3	Модернізація повітрянагрівачів	61 кг CO ₂ /т чавуну	0	100	2023
4	Заміна розливання у зливки на безперервний спосіб	276 кг CO ₂ /т сталі	52,26	95	2022
5	Заміна мартенівського виробництва конвертерним	354,1 кг CO ₂ /т сталі	69,3	92,5	2022

тивно може бути запроваджено саме в рамках модернізації схеми «доменна піч-конвертор».

Для визначення динаміки впровадження найкращих доступних технологій застосовано моделювання шляхом побудови S-подібних кривих із використанням формули:

$$n_t = \frac{M}{1 + e^{\left[\frac{-\ln(81)}{\Delta_t} (t - t_m) \right]}}, \quad (2)$$

де M – рік остаточного насичення ринку;

Δ_t – інтервал часу в роках, протягом якого насичення ринку зростає з 10% до 90%;

t_m – середина циклу насичення – коли $n_t = M/2$.

Розраховані за даними табл. 3 та формули (2) траєкторії, що зображують динаміку впровадження НДТ, наведені на рис. 1.

Рис. 1. Динаміка впровадження НДТ (позначення – у табл. 3)

Результати та обговорення. Статистичні дані та результати моделювання виробництва, споживання та експорту сталі за трьома сценаріями відповідно до припущень, окреслених у таблиці 1, наведено на рисунках 2–4. Очевидно, однією з передумов реалізації розроблених сценаріїв є зростання внутрішнього попиту на сталь, що відповідає стратегічним засадам соціально-економічного розвитку України. Водночас має бути збережено ринки для експорту сталі, принаймні, на сучасному рівні.

Рис. 2. Статистичні дані та результати моделювання виробництва, споживання та експорту сталі за сценарієм «помірне виробництво – помірне споживання» (млн т на рік)

Рис. 3. Статистичні дані та результати моделювання виробництва, споживання та експорту сталі за сценарієм «високе виробництво – високе споживання» (млн т на рік)

Рис. 4. Статистичні дані та результати моделювання виробництва, споживання та експорту сталі за сценарієм «помірне виробництво – високе споживання» (млн т на рік)

Розраховані згідно з розробленою моделлю питомі викиди діоксиду вуглецю на тону сталі за умови впровадження НДТ, наведених у таблиці 3, в період до 2030 року показане на рисунку 5, де також наведені статистичні дані з 1990 року для України та ЄС, а також середньосвітовий показник за період 2003–2017 років, доступний зі статистичної звітності Світової асоціації сталі [11]. Сумарне скорочення викидів становитиме 25% від поточного рівню, що відповідає показнику питомих викидів 1,77 т CO₂/т сталі, тобто дещо перевищує сучасний середньосвітовий показник (1,83 т CO₂/т сталі у 2017 році). Варто зазначити, що порівняно низькі показники питомих викидів в Україні у період 2000–2013 років пов'язані з екстенсивним використанням імпортованого природного газу в доменному та мартенівському виробництві та не можуть слугувати орієнтиром для модернізації. Окрім того, набагато нижчі показники питомих викидів в ЄС не завжди є ознакою екологічної досконалості, але зумовлені суттєво різною структурою виробництва сталі, чавуну та залізничних матеріалів щодо України (детальний аналіз відмінностей наведено в роботі [8]).

Результати моделювання викидів діоксиду вуглецю на металургійних підприємствах України на основі різних сценаріїв зростання виробництва (помірне та високе), розроблених у попередньому етапі, а також без зростання наведено на рисунку 6, де також наведено дані статистичної звітності про викиди CO₂ у період 1990–2018 років.

Рис. 5. Скорочення питомих викидів CO_2 в результаті впровадження НДТ

Рис. 6. Статистичні дані та прогнозовані викиди CO_2 на металургійних підприємствах України при впровадженні НДТ за умов реалізації різних сценаріїв розвитку виробництва сталі

Як видно з отриманих за результатами моделювання даних (рисунок 6), за умови реалізації сценаріїв, які передбачають зростання виробництва сталі, після 2022 року, коли максимального темпу набирає поширення найкращих доступних технологій (що видно з рисунку 1), спостерігається скорочення валових викидів діоксиду вуглецю, незважаючи на те, що відбувається пропорційне щорічне зростання виробництва (рисунки 2–4), тобто забезпечується відокремлення кількості викидів від зростання виробництва, що є одним з головних завдань Паризької угоди з запобігання зміни клімату. Причому в разі помірнього зростання виробництва сталі викиди CO_2 у 2027 році навіть дорівнюватимуть рівню, що спостерігався у 2018 році. Втім, після 2027 року потенціал скорочення викидів шляхом впровадження НДТ поступово вичерпується, внаслідок чого спостерігається суттєве зростання викидів CO_2 : для сценарію з помірним зростанням викиди у 2030 році перевищуватимуть показник 2018 року на 5,7%, а для сценарію зі швидким зростанням викиди 2030 року перевищують показник 2018 року на 23,4%.

Лише для сценарію без зростання виробництва сталі спостерігається постійне скорочення викидів CO_2 , з досягненням у 2030 році показника, що становить 72,2% від рівня 2018 року. Втім, такий варіант не відповідає стратегії індустріалізованого соціально-економічного розвитку України.

Моделювання свідчить, що валові викиди CO_2 за період 2021–2031 років становитимуть 0,42, 0,52 та 0,57 млрд $\text{m}^3 \text{CO}_2$ для сценаріїв без зростання, з помірним та швидким зростанням відповідно. Варто зазначити, що за відсутності впровадження НДТ викиди становили б за зазначеними сценаріями 0,49, 0,62 та 0,68 млрд $\text{m}^3 \text{CO}_2$ відповідно.

Таким чином, у рамках соціально-економічних сценаріїв, що передбачають зростання виробництва сталі, для забезпечення галузевих завдань та зобов'язань України за Паризькою кліматичною угодою, після 2027 року має розпочатися впровадження інноваційних технологій виробництва чавуну та сталі, що мають значно більший потенціал скорочення викидів порівняно з найкращими доступними технологіями. Аналіз таких технологій та перспективи їх впровадження у світі раніше було розглянуто в роботі [12]. Аналіз можливостей та очікуваних результатів застосування таких технологій в Україні буде досліджено в нашій наступній роботі.

Головні висновки. З урахуванням потреби у науково обґрунтованих даних для прийняття рішень із модернізації чорної металургії України відповідно до міжнародних зобов'язань у сфері клімату, виконано моделювання сценаріїв виробництва і споживання сталі та перспектив скорочення викидів парникових газів шляхом впровадження найкращих доступних технологій (НДТ) у металургійній галузі України до 2030 року. Модернізація агломераційних фабрик, модернізація повітрянагрівачів доменних печей, впровадження газових утилізаційних безкомпресорних турбін для використання енергії стиску доменного газу, зміна мартенівського виробництва конвертерним та впровадження безперервної розливки сталі може забезпечити сукупне скорочення питомих викидів CO_2 на тону сталі до 25%. Результати моделювання свідчать, що скорочення середньорічного показника викидів CO_2 шляхом впровадження НДТ забезпечується лише за умов відсутності зростання виробництва сталі. За умов помірнього зростання виробництва сталі впровадження НДТ забезпечує стабілізацію сумарних викидів приблизно на сучасному рівні, а за умов пришвидшеного зростання виробництва сталі загальні викиди CO_2 збільшуються навіть при впровадженні НДТ. З урахуванням міжнародних зобов'язань України зі скорочення викидів парникових газів, протягом наступних 5–7 років має розпочатися впровадження інноваційних технологій виробництва чавуну і сталі з метою забезпечення більш радикального скорочення викидів CO_2 , ніж це можливе за рахунок впровадження НДТ.

Література

1. Угода про асоціацію Україна-ЄС. URL: <https://www.kmu.gov.ua/diyalnist/evropejska-integraciya/ugoda-pro-asociaciyu> (дата звернення 14.05.20)
2. Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів: Закон України від 12.12.2019 № 377-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/377-20> (дата звернення 14.05.20)
3. Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003. URL: https://web.archive.org/web/20070412154746/http://europa.eu/eur-lex/pri/en/oj/dat/2003/l_275/l_27520031025en00320046.pdf (дата звернення 14.05.20)
4. Проект Національного кадастру антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів в Україні за 1990-2018 роки. URL: <https://menr.gov.ua/news/34928.html> (дата звернення 14.05.20)
5. Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a Clean Energy System / IEA. URL: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ETP2012_free.pdf (дата звернення: 14.05.20)
6. Steel statistical yearbook 2018. URL: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:37ad1117-fefc-4df3-b84f-6295478ae460/Steel+Statistical+Yearbook+2016.pdf> (дата звернення: 14.05.20)
7. Амоша А.И., Большаков В.И., Минаев А.А., Залознова Ю.С., Збаразская Л.А., Макогон Ю.В. и др. Украинская металлургия: современные вызовы и перспективы развития : монография. Донецк : НАН Украины, Ин-т экономики пром-сти. 2013. 114 с.
8. Shatokha V. Ukraine's commitments under Association Agreement: Challenges and opportunities for the steel industry. *Materiaux et Techniques*. 2019. Volume 107. Issue 1. Article number 2018044; DOI: 10.1051/mattech/2018044. URL: https://www.researchgate.net/publication/331933686_Ukraine%27s_commitments_under_Association_Agreement_challenges_and_opportunities_for_the_steel_industry (дата звернення: 14.05.2020)
9. Shatokha V., Stalinskiy D., Coole T., De Lepeleer G., Karpash M., Kruhlenko L., Petrenko A., Saey P., Shvets I Environmentally sustainable industrial development. URL: <http://euclim.com/wp-content/uploads/2016/02/Environmentally-sustainable-industrial-development.pdf> (дата звернення: 14.05.2020)
10. International Energy Agency, 2017. Energy Technology Perspectives: Catalysing energy technology transformations, OECD/IEA, Paris. URL: https://www.oecd.org/about/publishing/Corrigendum_EnergyTechnologyPerspectives2017.pdf (дата звернення: 14.05.2020)
11. Worldsteel Association, 2018. Sustainability indicators 2003 - 2017. URL: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:6315d64c-c3a9-460b-8f80-dcbeaeaac5c4/Indicator%2520data%25202003%2520to%25202017%2520and%2520relevance.pdf> (дата звернення: 14.05.2020)
12. Shatokha V. Chasing shadows: Technology and socioeconomic barriers versus climate targets for iron and steel industry. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2018. Volume 92. Issue 1. Pages 33–40. DOI: 10.5604/01.3001.0012.5510.